

Studying on Deposit Dynamic Characteristics and Preventing Measures of Debris Flow Along Highway in Western Mountain

Xiwang WEI, Jingsheng DING

College of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China

Abstract: Debris flow is a type of natural geological disaster that frequently occurs suddenly in the western mountains because of the rainstorm. It is almost inevitably that highways cross accumulative region which is main focus of forming disasters, the effect of river bed erosion and deposition is the most obvious dynamic characteristics in debris flow complicated movement, and one of main dynamic force to destroy highway too. Based on Bagnold dilatant fluid model, Firstly, the process of deposit dynamic characteristics of debris flow is analyzed and deduced, equilibrium concentration of debris flow and gradient of deposition are two main factors which have influence on sedimentation morphological characteristics of debris flow. Then, 12 large disastrous debris flow gully is selected, and the morphological characteristics of each debris flow deposited scopes has been studied. gradient of depositions of 12 large disastrous debris flow gully are calculated. And the deduced method is proved to be valid by comparing result with the result of the actual measurements, rationality of theoretical models is verified. Lastly, the prevention and cure counter measure are put forward. The study results could present scientific guidance to road alignment selection of highway and its gully-crossing bridges and culverts and as well as the optimal design of disaster prevention and control project in western mountains.

Keywords: Western mountain; Debris flows along highways; Bagnold dilatant fluid model; Accumulative region of debris flow; Gradient of deposition

西部山区公路沿线泥石流淤积动力特性及防治研究

韦锡望, 丁静声

重庆交通大学土木建筑学院 重庆 中国 400074

摘要: 受暴雨影响, 公路泥石流是常发生在我国西部山区公路沿线的一种突发性自然地质灾害现象, 泥石流堆积区是泥石流主要的成灾焦点, 也是公路不可避免跨越的区域; 泥石流在淤积区的冲刷淤积作用是泥石流最明显动力特征和公路主要的水毁动力。基于拜格诺膨胀流模型理论, 首先对泥石流淤积过程进行力学分析和推导, 结果显示泥石流饱和浓度、淤积坡度是影响泥石流淤积特征主要因素; 然后选取东川区域 12 条大型灾害性泥石流沟堆积扇并研究其形态特征, 得出 12 条沟的淤积坡度, 并与实测坡度对比分析, 证明了计算坡度的合理性, 验证了模型运用的合理性; 最后提出防治对策; 研究结果为西部山区公路选线, 桥涵建设选址及防治工程优化设计提供科学依据。

关键词: 西部山区; 公路泥石流; 拜格诺膨胀流模型; 泥石流堆积区; 淤积坡度

1 引言

泥石流是在暴雨、冰雪融水等丰富水源作用下, 介于挟沙水流和滑坡体之间的固液气三相混合特殊洪流。泥石流类型复杂, 地域性差异大, 其堆积形态有很大差异。我国西部山区山势陡峻, 部分地区因植物覆盖度低而使沟道上游储备有丰富的沉积物源, 在夏季多暴雨条件下多暴发泥石流, 并能在短时间内暴发

出巨大能量将坡上或沟道内大量泥沙石块携带至下游, 造成泥石流沟口冲积物堆积泛滥形成大面积堆积扇。堆积扇是人们生产生活最密集的场所, 更是西部山区公路、铁路、桥涵及交通设施在交通布局中不可避免需要跨越的地区, 泥石流堆积扇的不断淤高和扩大对河滩地、村镇居住点及交通设施的淤埋、淹没和冲毁等具有重大负面影响。2011 年 7 月 3 日, 国道 213 线因暴雨突发多处泥石流灾害, 导致都汶公路 700

余米的道路路基受损和淤埋造成而通行中断。2014年7月8日,鲁甸县多个乡镇发生山洪、泥石流灾害,道路和农田淤埋严重,灾害造成4人遇难、8人受伤、7人失踪。影响堆积扇演变的因素很多,除泥石流流速、浓度及河床质级配等因素外,淤积坡度也是影响泥石流堆积最重要因素之一。河床纵坡由上向下逐渐变缓,下游堆积扇的纵坡一般介于2—3°。目前对淤积坡度的研究较少,因此开展沟道泥石流淤积坡度及泥石流的堆积特征的研究,对区域交通布局及人类活动具有重要意义。

泥石流淤积区给区内交通布局和农田水利造成极其严重的危害。多年来,众多学者们积极从泥石流理论模型、野外观察、实验探究及理论应用等对泥石流淤积过程做了大量研究,以期优化泥石流防护结构和提高淤积区治理效果。人们常运用的泥石流模型研究主要分两类:一类是基于屈服应力和粘性角度考虑的单一相流体模型,主要包括宾汉结构粘性流模型[1]、拜格诺膨胀流模型[2][3]、膨胀粘塑流模型[4]、连续混合流模型[5]及考虑含有孔隙水压力的库伦颗粒流模型[6];另一类是把泥石流体中的浆体和粗颗粒分开考虑的两相流体模型[7];上述两类泥石流模型分别体现泥石流不同特征,但还不能全面的反映泥石流特征,更多特性有待于更为长久广泛的验证。吴积善(1993)等[8]和游勇(2005)[9]通过对泥石流沟床淤积现象做了大量的野外观察,并对阵性粘性泥石流淤积物级配、冲淤坡度、泥深、流速、拖曳力与沟床冲淤值的关系进行归纳和总结,提出有效的治理对策。苏联泥浆水力学专家希辛柯.P.И(1957)[10]通过改变斜槽坡度研究泥石流的平衡状态和淤积特性;周银军(2008)[11]和高先刚(2010)[12]等分别对桩式透水丁坝和透水丁坝的冲淤特性进行实验研究;林雪平(2013)[13]通过单次淤积实验和连续淤积实验,探讨了不同的泥石流重度、沟床物质重度、沟道坡度及泥石流总量影响淤积厚度的沟道淤积规律。廖谦(2000)等[14]利用阵性泥石流运动与堆积的欧拉-拉格朗日模型模拟了阵性泥石流的运动过程和堆积形态,泥石流密度、堆积坡度和各阵泥石流时间间隔是影响阵性泥石流堆积特征的3个重要因素。近年来,常用泥沙数值模拟[15-16]探讨泥石流淤积形态和淤积规律。从大量的泥石流淤积研究看出,目前对泥石流淤积过程研究还缺乏对冲淤动态过程及影响其运动因素之间关系定量描述,不能有效系统和定量的模拟研究泥石流在沟道中

的冲淤动态过程和预测和提出因地制宜有效优化防护结构和防治对策。快速科学地计算处泥石流淤积坡度,提出有效合理的防治对策,对公路选线、桥涵工程选址和保障公共安全具有实践意义。

为了能更为深入地认识西部山区公路沿线泥石流淤积特征,依托云南省交通科技项目“泥石流地区高速公路建设关键技术研究”,基于泥石流拜格诺膨胀流模型探究泥石流浓度、沟道淤积坡度对淤积形态的影响;分析项目区域12条典型灾害性泥石流沟堆积扇形态,并对它们的淤积坡度进行定量计算并验证分析,提出淤积区防治对策。

2 泥石流淤积动态力学模型

2.1 拜格诺膨胀流模型理论基础

1954年,英国科学家拜格诺[4]基于动量守恒提出固液两相流中固体颗粒间碰撞可以透过动量转换形成颗粒间离散剪应力 τ 和颗粒间离散应力 P_d ,存在 $\tau = -P_d \tan \alpha$ 本构关系,其中 $\tan \alpha$ 为动摩擦系数。暴雨性泥石流能挟带很大的漂砾,这正是水流的紊流作用所不能解释的,原因不是泥石流具有宾汉屈服应力能使大体积的漂砾不下沉,因而,西部山区暴雨过后泥石流的运动和淤积特征必有其内在原因,按照拜格诺理论,任何形式的运动必须克服特定形式的阻力而消耗能量;与这种阻力相对应,承载砾石的泥石流浆体发生剪切运动,维持剪切运动的力具备沿流体运动方向的分力。借助拜格诺的分散应力概念,Takahashi(1980)[3]提出了泥石流拜格诺膨胀流模型并在1992年将侵蚀相的估计加入模型中,根据流体的剪切速率计算托浮在水体中固体颗粒的离散应力与剪切应力的对应关系,建立了求解泥石流相关特征值的泥石流运动方程。近年来,随着对泥石流特征值、流变特征及静动力学的不断深入研究,发现泥石流拜格诺模型能合理解释泥石流起动和冲淤特征,特别在国际泥石流起动机理研究方面产生深远影响,为泥石流淤积区的研究提供借鉴,因此,运用泥石流拜格诺膨胀流模型进行泥石流淤积坡度研究具有实际意义,为制订科学可行泥石流防治规划方案提供理论基础。

2.2 泥石流淤积力学分析

我国西部山区典型泥石流沟可分为形成区、流通区及沉积区等三个区,泥石流在三个区的发育状态、冲淤机理各有不同,交通干线不可避免跨越泥石流堆

积区。深入研究泥沙沟道淤积坡度，合理布置交通干线线位高度，避免交通构造物被泥石流冲毁和掩埋，采取有效防护措施在交通建设中具有重要意义。

泥石流进入下游地势较为平坦的堆积区，假设有一厚度为 D 均匀的泥石颗粒层，在水流渗流作用下颗粒间的空隙处于饱和状态。泥石流发生淤积时沟床坡度为 ϑ_1 ，泥石流堆积坡度为 ϑ_2 。取一长为 L 、宽为 b 的泥石流体并对其进行受力分析，典型的切应力何阻力分布如图 1，

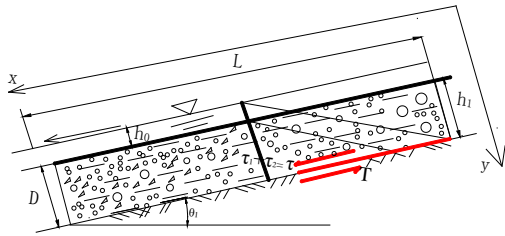


Fig1 tangential stress and resistance of granular-gullybed
图 1 沟床颗粒层切应力和阻力分布示意图

图中泥石流体运动过程中总抗滑力为 T ，泥石流体运动的剪切力为 τ ，颗粒间离散的剪切力为 τ_1 ，填充液体的剪切力为 τ_2 ， $\tau_2 = T - \tau_1$ ，为表征颗粒间碰撞时产生一个综合作用结果下的剪切角即动摩擦角，设为 α ，则 $\tan \alpha$ 为运动摩擦系数，该值随着颗粒组成状况和浓度变化，当浓度很稀时， $\alpha \rightarrow 0$ ，颗粒达到极限浓度；用内摩擦角 ϕ 表征泥石流堆积体的滑动过程， $\tan \phi$ 即为堆积区静力摩擦系数，建立砾石在流体中的受力平衡方程：

$$\tau = P_d \tan \alpha \quad (1)$$

对于恒定、均匀的泥石流将运动至淤积区，总阻力抗滑力 T ：

$$T = [(\gamma_s - \gamma_c)C_{d1} + \gamma_c] h \sin \vartheta_1 \quad (2)$$

式中 γ_s 为颗粒的容重， γ_c 为泥浆体容重， C_{d1} 为颗粒体积浓度，一般介于 0.50—0.70 之间。

$$\tau = [(\gamma_s - \gamma_c)C_{d1} + \gamma_c] h \cos \vartheta_1 \quad (3)$$

$$\tau_1 = [(\gamma_s - \gamma_c)C_{d1} + \gamma_c] h \cos \vartheta_1 \tan \alpha \quad (4)$$

在淤积区当泥石流层处于受力平衡深度 h 处，剪切力等于抗滑力：

$$T = \tau_1 + \tau_2 \quad (5)$$

由 (2)、(4) 和 (5) 得：

$$T : \tau_1 : \tau_2 =$$

$$1 : \frac{(\gamma_s - \gamma_c)C_{d1} \tan \alpha}{[(\gamma_s - \gamma_c)C_{d1} + \gamma_c] \tan \vartheta_1} : \left(1 - \frac{(\gamma_s - \gamma_c)C_{d1} \tan \alpha}{[(\gamma_s - \gamma_c)C_{d1} + \gamma_c] \tan \vartheta_1}\right) \quad (6)$$

假设泥石流在平衡运动状态下，(6) 式中当 $(\gamma_s - \gamma_c)C_{d1} \tan \alpha / [(\gamma_s - \gamma_c)C_{d1} + \gamma_c] \tan \vartheta_1 = 1$ 时，得最大的颗粒浓度 C_d ：

$$C_d = \gamma_c \tan \vartheta / (\gamma_s - \gamma_c) (\tan \alpha - \tan \vartheta_1) \quad (7)$$

泥石流开始产生淤积时受力与泥石流起动类似，在暴雨作用下，水深为 h_0 的地表径流携带高度为 h_1 ，浓度为 C_{d1} 泥沙从淤积区上游进入淤积区，忽略流体变形产生的作用力，水渗透陡坡上颗粒层中岩粒形成饱和和混合体，当 τ' 大于 τ_1' 时，颗粒层开始运动。地表径流深为 h_2 处有效剪切力 τ' 和颗粒层阻力 τ_2' 为：

$$\tau' = [C_{d2}h_1 + C_{d2}h_2](\gamma_s - \gamma_c) + \gamma_c(h_0 + h_1) \sin \vartheta \quad (8)$$

$$\tau_1' = C_{d2}h_1 + C_{d2}h_2(\gamma_s - \gamma_c) \cos \vartheta \tan \phi \quad (9)$$

在泥石流沿沟床冲刷过程中， h_2 以上的颗粒层开始运动，成为龙头前缘主要部分，若沟床不再被冲刷时，即高度为 $h_2 = 0$ ，且 τ' 等于 τ_1' 时，沟床地面沟能保持不被冲刷的条件，颗粒浓度 C_d 满足：

$$C_d = \gamma_c \tan \vartheta_1 / (\gamma_s - \gamma_c) (\tan \phi - \tan \vartheta_1) \quad (10)$$

泥石流进入淤积区至停滞的过程，其浓度满足于：

$$\gamma_c \tan \vartheta_1 / (\gamma_s - \gamma_c) (\tan \alpha - \tan \vartheta_1) \geq C_d \geq \gamma_c \tan \vartheta_1 / (\gamma_s - \gamma_c) (\tan \phi - \tan \vartheta_1) \quad (11)$$

2.3 泥石流淤积坡度模型结果讨论分析

从上述讨论看出，泥石流进入淤积区至于堆积区的运动过程与泥石流浓度和泥石流淤积坡度和泥石流堆积坡度存在密切关系。从式 (6) 看出，泥石流浓度愈低，填充液体的剪切力愈大。当颗粒浓度 C_{d1} 处于临界点最大的颗粒浓度 C_{dm} 时，将式 (10) 代入 (6) 中，得 $T/\tau_1 = \tan \alpha / \tan \phi$ ，从式中看出， $\tan \alpha$ 与 $\tan \phi$ 之比愈大，颗粒之间的剪切应力愈小，则填充液体的剪切应力愈大。当 $\tan \vartheta / \tan \phi = 1$ 时，颗粒浓度达到最大，这时极易发生塌滑。当 $\tan \alpha \rightarrow 0$ 时，颗粒之间相互作用产生的剪切应力几乎为 0，说明颗粒浓度很稀，颗粒的悬浮几乎完全依赖于脉动扩散作用。当颗粒浓度接近于 C_{dm} 时，由上游来的泥石流挟带颗粒浓度接近于这一含颗粒量进入较为平坦的沟道，满足于 $\tan \vartheta / \tan \vartheta_1 = \tan \alpha / \tan \phi = T / \tau_1$ ，即坡度减缓到 $\tan \vartheta = \tan \vartheta_1 \tan \alpha / \tan \phi$ 时，此时泥石流含沙量接近于 C_{dm} ，若坡度 ϑ 再减小，则泥石流必然要发生淤积。泥石流进入淤积区后，淤积坡度变化使得过流断面剧烈加宽，从而使流体呈扇状散流，散流程

度取决于泥石流容重和堆积坡度，一方面，泥石流容重愈小，散流程度愈大，使流体深度减小；同时，随着堆积坡度减小，导致泥石流携带砾石的能力逐渐减弱至停滞甚至回淤。在小江流域大白泥沟、小白泥沟、豆腐村沟、许家小河等多条泥石流沟堆积都具有这样的规律。

3 模型应用分析

3.1 项目区概况

昆明市功山至东川高速公路位于昆明市北部，起于G85（重庆-昆明）嵩明-待补高速段（功山收费站）、经阿旺、姑海，止于东川，全长约50公里，项目区和小江流域主要泥石流沟区位图如图2。区域内夏季多暴雨，公路沿线岩体强烈破碎，风化严重，地表松散岩体极其丰富，地表植被稀疏，沟谷发育，在暴雨作用下造成泥石流灾害极其发育，项目区内分布着大白泥沟、小白泥沟、黑水河等12余条泥石流沟堆积区严重威胁拟建公路建设和运营安全，因此，评估泥石流淤积机理和规律对河床水位的影响规律，提出公路沿线泥石流防治措施及路线、结构物布设一体化方案，为安全选线提供科学的指导。

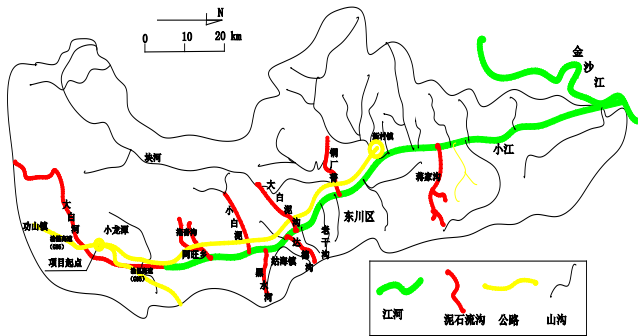


Fig2 Location of project area and typical debris flow gullies of Xiaojiang River basin

图2 小江流域典型泥石流沟及项目区区位图

3.2 淤积区特征分析

项目区12条大型典型灾害性泥石流主要特征参数如表1，堆积扇形态如图3。区内堆积区主要由老泥石流堆积扇和新泥石流堆积扇组成，其中大白泥沟和尖山沟堆积扇如图4和图5，泥石流在暴雨条件下发育强烈，淤积区堆积扇扩展难于预测和治理，直接危及公路和铁路及其交通设施，堆积区主扇长、扇宽、

堆积扇面积、堆积区纵坡降比等是组成堆积扇形态的重要特征值，充分认识堆积扇特征值对泥石流淤积机理和淤积坡度研究具有重要理论指导意义。从表1可以看出，堆积扇主扇长主要介于1-4km，占75%；扇宽主要在0.2-1km之间，占83.4%；堆积扇面积主要介于0.5-1.5km²；占83.4%；堆积区主要纵坡降比介于5%-15%，占83.4%。从该区堆积扇形态特征看出，该区堆积扇主扇长，面积大，且多条泥石流沟规模大且较为集中，淤积区坡降平缓是交通难于布局和堵塞江河的主要原因。

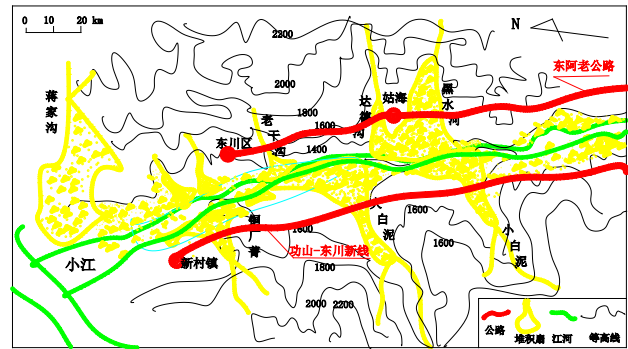


图3 项目区主要典型灾害性泥石流堆积扇



图4 潜伏期中的大白泥泥石流沟堆积扇实景

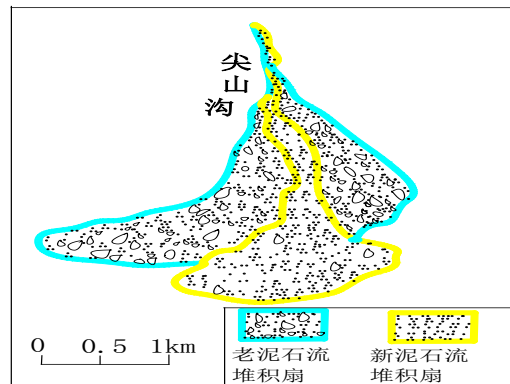


Fig5 Deposition fan of Jianshangully

图5 尖山沟堆积扇

Table1 The main characteristic values of 12 debris flow bullies in project areas

表 1 项目区 12 条泥石流沟淤积区主要特征参数表

沟名	泥石流容重 /kgm ⁻³	泥沙容重 /kgm ⁻³	颗粒体积分数 C*/kgm ⁻³	动摩擦系数 α	静摩擦系数 φ	主扇长 /km	平均扇宽 /km	平均面积 /km ²	平均纵比降/%	堆积坡度 g ₁ /°	淤积坡度 g/°	实测淤积坡度 g'/°	相对误差 μ/%	泥石流质	堆积区交通情况
黑沙沟	2.09	2.69	0.64	2.44	1.83	0.7	0.3	0.21	14.3	8.14	10.85	11	0.01	粘性	公路
大白泥沟	2.10	2.71	0.64	3.25	2.13	4.0	0.35	1.4	5.24	3.00	4.58	4.97	0.08	粘性	铁路、公路
小白泥沟	2.06	2.71	0.62	2.74	2.40	2.5	0.24	0.6	6.1	3.49	3.99	3.72	-0.07	粘性	铁路、公路
黑水河	1.80	2.56	0.51	1.96	1.14	2.0	0.2	0.4	13.1	7.46	12.83	11.31	-0.13	稀性	铁路、公路
达德沟	2.00	2.71	0.58	2.44	1.83	1.5	0.75	1.3	18.5	10.48	13.97	13.77	-0.01	粘性	铁路、公路
石羊沟	2.09	2.65	0.66	2.55	2.20	3.5	0.5	1.75	8.0	4.57	5.30	5.99	0.11	过渡	铁路、公路
深沟	2.13	2.70	0.66	2.44	1.83	1.5	0.15	0.23	8.7	4.97	6.63	6.28	-0.06	粘性	铁路
达朵沟	1.95	2.65	0.58	2.08	1.12	4.0	0.3	1.2	5.0	2.86	5.32	4.57	-0.16	间歇	公路
尖山沟	1.90	2.73	0.52	2.01	1.12	4.5	0.59	2.66	7.4	4.23	7.60	6.84	-0.11	过渡	公路
太平村沟	1.94	2.71	0.55	2.01	1.12	0.63	1.25	0.78	6.5	3.72	6.67	7.01	0.05	粘性	公路
蒋家沟	2.16	2.70	0.68	2.44	1.83	6.0	0.3	1.79	5.0	2.86	3.82	4.29	0.11	粘性	铁路、公路
大桥河	2.06	2.70	0.62	2.21	1.43	5.0	0.8	4.0	4.0	2.29	3.54	4.00	0.11	粘性	铁路、公路

3.3 模型计算及结果分析

12 条泥石流沟的堆积坡度、淤积坡度及淤积坡度相对误差分析如表 1。从表 1 看出，除黑水河和达朵沟误差较大外，其它各条泥石流沟道淤积坡度计算值在合理误差区间内。据实地勘察，黑水河流域内主要岩性为白云质灰岩，多断层，岩石破碎且风化也较为严重，使黑水河岸坡处于不稳定状态，当地人们分别在上游形成区种植树林并修建截流槽，流通区设置拦挡坝，堆积区修建 2000 米的排洪道，这些工程防护措施有效减缓了沟床纵坡，因此，计算坡度偏大。而达朵沟是一条间歇性泥石流沟，活动周期大约是 10 年；大规模爆发时停积在沟口的泥石流将堆积扇淤高 3 米以上，规模小时，粘度低属于稀性泥石流，泥石流浓度的变化较大，使得计算结果与实测值与较大偏差。12 条灾害性泥石流计算坡度值为公路选线、桥涵设计、泥石流沟整治和河滩地有效利用提供科学指导。

4 堆积区防治规划对策

由于流通区通过的交通干线，流通区泥石流较为活动活跃，沟床比降较大，冲刷程度强烈，冲刷沟道比较弯曲，特别是地质条件较差时，容易冲毁掏空路基、桥涵及沿沟构筑物甚至完全破坏排泄结构等。因此，在泥石流活动较为强烈的地区，交通布局不可避免地通过堆积区，堆积区泥石流较为稳定，交通干线可选在冲积扇的外缘堆积区，沿冲积扇等高线布设，

根据生产力需求和泥石流沟道地貌特征，变被动为主动，通过改变淤积坡度，进而改变泥石流散流程度和堆积形态，并采取“拦”、“挡”、“排”等有效防护防治措施，可以避免路基、桥涵等被暴雨性泥石流瞬间冲毁。通过对东川交通沿线泥石流灾害进行调查，为改善交通干线的运输状况，针对项目区 12 条大型灾害性泥石流沟堆积区形态和泥石流堆积坡度分析，采取有效可取方案，防治规划如下：

- (1) 蒋家沟、大白泥沟、大桥河等上游支沟汇集区拓宽空间并修建合理坡度梯级拦挡坝设施。
- (2) 大白河泥、小白泥、大桥河等淤积面积较大纵坡比降较小的泥石流沟，它们是交通必过的“盲肠”段，设置合理坡度的排洪道和泥石流隧道并对公路其进行拓宽加固，保证交通时时畅通。
- (3) 黑水河为稀性泥石流沟，可修建合理坡度宽度公路桥涵，留足净空，以便堆积物排泄畅通。
- (4) 对达德沟、黑沙沟等比降较大的粘性泥石流沟，建立排导槽，并加固拦挡工坝防阻塞河道。
- (5) 对于堆积扇不太宽，坡降较小的达朵沟和深沟，形成区大量种树，淤积区设置速流槽，采取生物与工程防护紧密结合，减少沟床堆积物。
- (6) 堆积扇不太长的太平村沟可适当拓长其沟口堆积区，修建导流堤以高路堤+桥涵跨越方式，线形标高不低于河床标高，净空充足不致冲淤。
- (7) 落实区域勘察选线，建立东川与外界新交通通道，使之成为东川交通的备用线，加强区内与外

界联系，减小交通停顿，扩大区内运输效率。

5 结语

基于拜格诺膨胀流模型，探究沟床淤积过程力学机理分析，推导出淤积坡度、堆积坡度与泥石流级配的关系式： $\tan \vartheta = \tan \vartheta_1 \tan \alpha / \tan \phi$ ；分析了项目区 12 条典型灾害性泥石流沟淤积形态特征；计算得出 12 条泥石流沟堆积坡度和淤积坡度，并将其与实测值作比较，分析计算淤积坡度值的合理性；一方面，说明淤积坡度是影响泥石流堆积形态的重要因素之一，同时验证了拜格诺膨胀流模型在东川区域泥石流淤积机理方面的合理性。针对项目区域 12 条泥石流沟淤积区对公路沿线的危害特征，提出防治规划对策。模型应用和淤积坡度、浓度的计算分析更加深入理解项目区影响泥石流堆积形态的关键因素，为西部山区公路泥石流淤积区公路选线、跨沟桥涵设计施工及防护工程优化设计提供了科学依据和技术支持。

资助项目

基金项目：云南省交通厅科技项目（云交科 2013（C）16）。

References（参考文献）

- [1] Johnson A.M, Rahn P.H. Mobilization of debris flows[J]. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 1970, 9 (Supplement): 168-186.
- [2] Takahashi T. Mechanical characteristics of debris flow[J]. *Journal of the Hydraulics Division*. 1978(104): 1153-1169,
- [3] Takahashi T. Debris flow on prismatic open channel[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1980, HY3: 381-396.
- [4] Chen C. Generalized viscoplastic modeling of debris flow[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1986, 114(3): 237-258.
- [5] Atkin R. J. and Craine R. E. Continuum theories of mixtures: basic theory and historical development[J]. *Quarterly Journal of Applied Mathematics (Part 2)*, 1976, 29: 209-244.
- [6] Iverson R. M. The physics of debris flows[J]. *Reviews of Geophysics*, 1997, 35(3): 245-296.
- [7] Wang Guang-qian, Ni Jin-ren. Basic equations of debris flow dynamics [J] *Chinese Science Bulletin*, 1994, 39(18): 1700-1704.
- [8] Wu Ji-san, Tian Lian-Quan, Kang Zhi-cheng. *Debris Flow and Its Comprehensive Treatment* [M]. Beijing: Science Press, 1993: 176-177.
- [9] You Yong, Cheng Zun-lan. Effect of Viscous Debris Flow Pattern Movement on Erosion and Deposition Evolution of Gully Bed [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2005, 25(2): 146-151.
- [10] Yuan En-xi, Chen Jia-lang. *Mud Hydraulics* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1957.
- [11] Zhou Yin-jun, Liu Huan-fang, He Chun-guang. Experimental Study on Local Scouring and Silting of Permeable Spur Dams [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2008, 1(3): 57-60.
- [12] Gao Xian-gang, Liu Huan-fang, Hua Gen-fu. Scouring and silting characteristics of pile - spillway [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2010(10): 81-84.
- [13] Lin Xue-ping, You yong, Liu Jin-feng. Experimental study on channel deposition of viscous debris flow under dynamic bed [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 31(3): 327-333.
- [14] Liao Qian, Ni Jin-ren. Application of Eulerian - Lagrangian model-II for formation movement and accumulation of debris flow [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2000, 9(4): 54-58.
- [15] Zhang Wan-shun, Zhao Yan-xin, Cui Peng. Numerical model of channel two - dimensional debris flow movement and scouring and silting [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 10(1): 1-5.
- [16] Bagnold R.A. "Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear," *Proc., Roy. Soc. London, Series A*, 1954. 25: 49-63.